

УДК 631.416.13:632.122.1:631.86

НИТРАТЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АГРОЦЕНОЗАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. Г. Е. Мерзлая*

*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
им. Д. Н. Прянишникова**127434 Москва, ул. Прянишникова, 31 а, Россия***E-mail: lab.organic@mail.ru*

В полевых опытах на дерново-подзолистых почвах исследовали агроэкологическую эффективность длительного действия навоза крупного рогатого скота различной влажности. Показано, что применение полужидкого бесподстилочного и подстилочного навоза при оптимизации доз и сочетаний с минеральными удобрениями улучшало плодородие почв, повышало продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборотов, обеспечивало экологическую безопасность агроценозов, снижало риски накопления нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях. Ежегодное внесение в течение 15 лет полужидкого навоза в дерново-подзолистую тяжелосуглинистую почву в кормовом севообороте в варианте органо-минеральной системы удобрения с содержанием 240 кг N/га обеспечило их высокую эффективность — 9.8 т з.е./га, что было на 96% больше контроля. Полученный корм характеризовался высокой протеиновой питательностью, а по содержанию нитратов соответствовал нормам кормления сельскохозяйственных животных. Применение возрастающих доз полужидкого навоза повышало продуктивность кормового севооборота с 7.28 до 10.3 т з.е./га в вариантах с применением единичной (N120) до четырехкратной дозы (N580). Увеличение дозы навоза до N600 оказалось неэффективным. В зависимости от дозы навоза изменялось содержание нитратов в слоях почвенного профиля. Наиболее интенсивно (в 3.7 раза больше, чем в контроле) накапливались нитраты в слое 0–100 см почвы в варианте с максимальной дозой навоза (N600). При этом не отмечено превышения содержания нитратов в почве свыше ПДК (130 мг NO₃⁻/кг). Установлена связь накопления нитратов от роста доз азота, внесенного с навозом, в почвенных слоях, особенно в верхних 0–100 и 100–200 см, при коэффициентах корреляции $r = 0.73$ и 0.60 . При длительном применении подстилочного навоза на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве было эффективным его сочетание с минеральными удобрениями в дозе N180, где ежегодный сбор зерновых единиц в среднем за 37 лет составлял 3.1 т з.е./га, или превышал контроль на 38.5%. Растительная продукция при этом отличалась высоким качеством — в зерне содержалось до 14.2% белка, в клубнях картофеля — до 13% крахмала при допустимом уровне содержания нитратов. Содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) и мышьяка, а также нитратов в почве зависело от интенсивности удобрения подстилочным навозом, но в целом соответствовало допустимым нормам.

Ключевые слова: полужидкий и подстилочный навоз, дозы и сочетания с минеральными удобрениями, свойства почвы, агроценозы, урожайность, нитраты, тяжелые металлы.

DOI: 10.31857/S0002188124080136, **EDN:** CDJWAW

ВВЕДЕНИЕ

В обеспечении продовольственной безопасности страны большое внимание уделяется внедрению современных агротехнологий, в том числе включающих применение биологизированных систем удобрения с использованием навоза и других побочных продуктов животноводства. Вовлечение таких продуктов в сельскохозяйственный оборот может служить одним из главных факторов

улучшения плодородия пахотных земель, роста производства высококачественной продукции растениеводства при эффективной защите окружающей среды [1, 2].

В последние годы выход навоза и птичьего помета заметно увеличивается благодаря строительству и реконструкции животноводческих комплексов. В Российской Федерации насчитывается ≈14.6 тыс. животноводческих сельскохозяйственных организаций,

в том числе специализирующихся на содержании крупного рогатого скота — ≈ 9 тыс., свиней — 1.5 тыс., птицы — 0.9 тыс. В сельскохозяйственных организациях ежегодно образуется ≈ 180 млн т побочных продуктов животноводства, характеризующихся высокой удобрительной ценностью, наличием органического вещества и необходимых для растений питательных элементов.

Рядом научных учреждений (ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, ВНИИ органических удобрений и торфа и др.) разработаны научные основы биологизированных агротехнологий с использованием органических удобрений, позволяющие успешно применять их на сельскохозяйственных полях [2, 3–5]. Вместе с этим, нарушение практических рекомендаций, в частности, завышение доз внесения удобрений, может повлечь за собой негативные последствия, такие как избыточное накопление в почве и растениеводческой продукции различных токсических веществ — нитратов, тяжелых металлов и др. [6, 7].

Цель работы — в полевых опытах с применением полужидкого бесподстилочного и подстилочного навоза крупного рогатого скота оценить их действие в системе почва—растение как с агрохимических, так и экологических позиций, в частности, определить влияние внесения навоза на загрязнение почв и растительной продукции нитратами и тяжелыми металлами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в полевых опытах на дерново-подзолистых почвах в Московской и Смоленской обл. Нечерноземной зоны Российской Федерации. В качестве органических удобрений использовали навоз крупного рогатого скота различной влажности. Из минеральных удобрений применяли аммоний азотнокислый (N_{aa}), суперфосфат (P_{cd}) и калий хлористый (K_x).

В длительном полевом опыте в Московской обл. (1986–1992 гг.) исследовали действие полужидкого бесподстилочного навоза крупного рогатого скота при ежегодном внесении под культуры кормового севооборота. Навоз влажностью 90% содержал в среднем 0.33% общего азота, 0.43% K_2O , 0.16% P_2O_5 , 0.6 мг Zn/кг, 0.2 мг Cu/кг, 0.2 мг Co/кг, 4.1 мг Mn/кг.

В длительном полевом опыте в Смоленской обл. (1979–2016 гг.) изучали агроэкологическую эффективность длительного применения подстилочного навоза крупного рогатого скота в полевом севообороте. При влажности 70% навоз содержал 0.5% общего азота, 0.2% P_2O_5 и 0.7% K_2O , 60% органического вещества при отношении C : N, равном 20. Валовое содержание тяжелых металлов

(ТМ) в навозе было невысоким: 0.1 мг Cd/кг, 1 мг Cr/кг, 1.0 мг Ni/кг, 0.6 мг Cu/кг, 7 мг Zn/кг в расчете на сухое вещество.

Полевые эксперименты закладывали и проводили в соответствии с методическими указаниями Географической сети опытов с удобрениями ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова и методикой Б.А. Доспехова [8–10]. Более подробно методика исследования в опытах приведена при обсуждении их результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полевом опыте ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, выполненном в Московской обл. (пос. Барыбино), исследовали длительное действие полужидкого навоза крупного рогатого скота на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Почва содержала 2.2% гумуса, была слабо обеспечена подвижными соединениями фосфора и калия. Исследование вели в кормовом севообороте с возделыванием кукурузы в 2-х полях, викоовсяной смеси, многолетних злаковых трав 2-х лет пользования. Изучали возрастающие дозы навоза, а также системы удобрения: органическую (навоз 2 дозы, соответствующие N_{240}), минеральную (NPK эквивалентно 2-м дозам навоза) и органо-минеральную (навоз 1 доза + NPK эквивалентно 1-й дозе навоза) с выровненным количеством основных питательных веществ. Удобрения в вариантах опыта вносили ежегодно в течение 3-х ротаций севооборота. Единичная доза навоза по содержанию азота соответствовала 120 кг N/га.

Опыт был заложен в четырехкратной повторности. Общая площадь делянки 96 м². Размещение вариантов рендомизированное. Учет урожая проводили поделочно сплошным методом.

В опыте возделывали среднеранний гибрид кукурузы Днепровский 547 МВ, вику Льговскую, овес Орел, травосмесь, состоящую из тимopheевки луговой, овсяницы луговой, костреца безостого и ежи сборной.

Согласно результатам исследования, с ростом доз бесподстилочного навоза при длительном его применении среднегодовая продуктивность кормового севооборота возрастала с 7.28 т з.е./га в варианте с одной дозой до 10.3 т з.е./га при четырехкратной дозе, соответствующей N_{580} (рис. 1).

Дальнейший рост дозы навоза не приводил к достоверному увеличению продуктивности возделываемых культур. Окупаемость 1 т навоза прибавкой урожая с возрастанием дозы понижалась с 64 до 36 кг з.е. При этом на уровне нормативной (50 кг з.е. в расчете на 1 т навоза) она была при внесении навоза в двойной дозе (N_{240}).

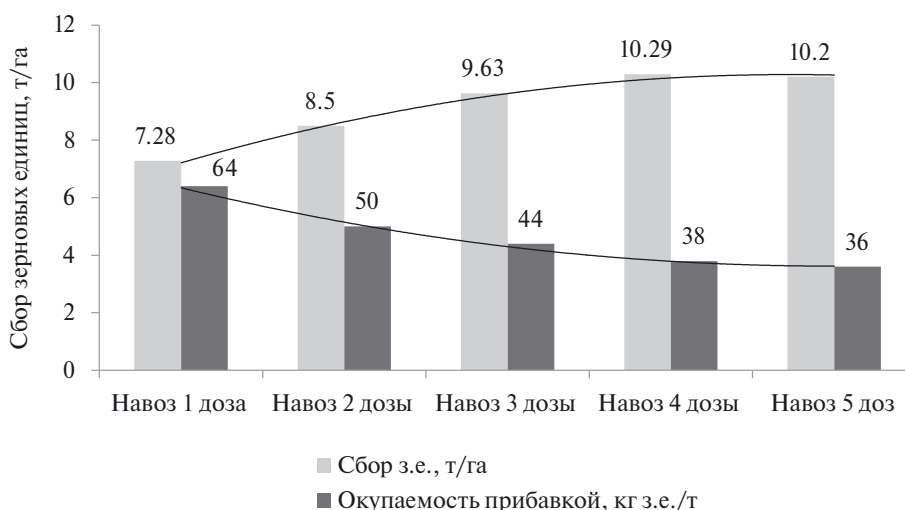


Рис. 1. Влияние возрастающих доз полужидкого навоза на продуктивность севооборота и окупаемость 1 т навоза.

Сравнительный анализ показал, что в вариантах исследованных систем удобрения (органической, минеральной и органо-минеральной), соответствующих по содержанию азота 240 кг/га, была получена урожайность культур севооборота в среднем за год соответственно 8.50, 9.86 и 9.84 т з.е./га, что больше контроля без внесения удобрений на 69–96%. При этом органическая система в варианте 2-х доз навоза по продуктивности севооборота уступала минеральной и органо-минеральной системам на 16%.

При рассмотрении действия ежегодно вносимого навоза на химический состав возделываемых культур установлено его положительное влияние на содержание в них сырого протеина (табл. 1).

Причем с ростом доз навоза прослежена тенденция к улучшению протеиновой питательности у кукурузы и многолетних злаковых трав. Более высокие показатели содержания протеина в кормовой массе наблюдали у всех культур при внесении минеральных удобрений.

Важно отметить, что повышение дозы навоза с единичной до пятикратной увеличивало накопление нитратного азота в зеленой массе кукурузы, а также в викоовсяной смеси и многолетних травах. Однако интенсивнее всего накапливался нитратный азот в кормах при применении полного минерального удобрения. Что касается меди и цинка, то их содержание в растительной массе испытанных культур мало изменялось при возрастании доз навоза, но, как правило, повышалось в вариантах с минеральными удобрениями.

В целом можно утверждать, что во всех вариантах применения органических и минеральных удобрений содержание нитратов и ТМ (меди

и цинка) в биомассе кормовых культур вполне соответствовало зоотехническим нормам кормления животных.

Ежегодное применение навоза в умеренных дозах положительно влияло на плодородие дерново-подзолистой почвы, оптимизировало ее гумусовое состояние и повышало обеспеченность подвижными соединениями фосфора и калия, что следует из данных, полученных в конце проведения полевого опыта (табл. 2).

Содержание минерального азота в пахотном слое почвы находилось в зависимости от возрастающих доз полужидкого навоза. Однако при ежегодном внесении даже высоких доз навоза в течение 3-х ротаций 5-польного севооборота загрязнения почвы нитратами не наблюдали. В варианте с максимальной, 5-кратной дозой навоза, соответствующей N600, содержание нитратного азота не превышало 17.6 мг/кг, что в 1.6 раза меньше ПДК, составляющей 29 мг N-NO₃/кг, или 130 мг NO₃⁻/кг (СанПиН 1.2.3685-21).

Заметных изменений в содержании подвижных меди и цинка в почве с ростом доз полужидкого навоза не отмечено (табл. 3).

При использовании средств химизации важное значение в экологическом отношении придается миграции нитратов по почвенному профилю. В приведенном полевом опыте определяли содержание нитратов в почве в слоях 0–100, 100–200, 200–300 и 300–400 см. При этом была выявлена четкая зависимость изменения данного показателя от вида удобрений и количества внесенного азота (рис. 2).

Таблица 1. Химический состав кормовых культур в зависимости от доз и сочетаний полужидкого навоза и минеральных удобрений

Вариант	Сырой протеин, %	N-NO ₃ , %	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг
Кукуруза (зеленая масса)				
Контроль без удобрений	7.8	0.04	4.7	20.0
Навоз 1 доза (N120)	9.6	0.10	4.1	18.6
Навоз 2 дозы (N240)	10.5	0.12	3.7	19.2
Навоз 5 доз (N600)	11.5	0.22	2.9	15.3
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	13.0	0.31	3.3	38.2
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	11.7	0.22	3.7	22.5
Викоовсяная смесь				
Контроль без удобрений	13.3	0.04	4.0	26.0
Навоз 1 доза (N120)	14.4	0.07	4.0	26.0
Навоз 2 дозы (N240)	15.5	0.14	6.0	26.0
Навоз 5 доз (N600)	14.4	0.20	5.0	27.5
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	15.0	0.28	5.0	35.0
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	15.4	0.19	5.0	27.5
Многолетние злаковые травы				
Контроль без удобрений	10.1	следы	4.8	17.5
Навоз 1 доза (N120)	10.4	следы	4.8	18.6
Навоз 2 дозы (N240)	11.8	следы	5.5	17.9*
Навоз 5 доз (N600)	14.3	0.05	5.2	19.4
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	15.3	0.19	5.6	22.4
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	13.7	0.08	5.1	19.9
Зоотехническая норма	14–15	0.5		
Максимально допустимый уровень			30	50

Таблица 2. Влияние длительного применения удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы

Вариант	Гумус, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг
Контроль без удобрений	2.05	115	75
Навоз 1 доза (N120)	2.17	195	189
Навоз 2 дозы (N240)	2.48	237	318
Навоз 5 доз (N600)	3.24	489	740
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	2.07	314	404
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	2.44	331	367

Таблица 3. Содержание подвижных форм азота и тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве при внесении возрастающих доз полужидкого навоза, мг/кг

Вариант	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NH ₄ + N-NO ₃	Zn	Cu
Без удобрений	5.4	7.7	13.1	1.3	3.4
Навоз 1 доза (N120)	6.7	8.3	15.0	1.2	3.3
Навоз 2 дозы (N240)	6.8	11.8	18.6	1.5	3.5
Навоз 3 дозы (N360)	6.1	17.4	23.2	2.2	3.8
Навоз 4 дозы (N480)	9.4	17.9	27.3		
Навоз 5 доз (N600)	7.9	17.6	25.5		
ПДК (СанПиН 1.2.3685-21)		29			

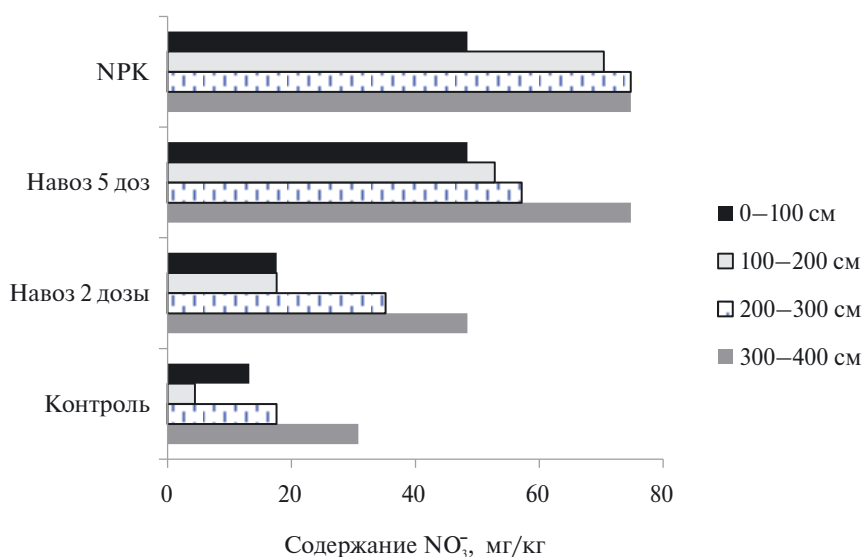


Рис. 2. Миграция нитратов по почвенному профилю в зависимости от применения навоза и минеральных удобрений.

По сравнению с контролем, где в верхнем слое 0–100 см почвы содержание нитратов составило 13,2, в глубоком слое 300–400 см — 30,8 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$, отмечено повышение его содержания при внесении двойной дозы навоза (N240) соответственно до 17,6 и 48,4 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$ и еще большее увеличение при 5-кратной дозе навоза (N600) — до 48,4 и 57,2 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$. Особенно сильно накапливались нитраты в варианте одностороннего применения минеральных удобрений (в дозе N240) — до 48,4 и 74,8 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$. Однако даже интенсивное ежегодное внесение полужидкого навоза (в дозе N600) не приводило к накоплению нитратов в почвенном профиле сверх ПДК (130 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$).

Корреляционный анализ также показал зависимость накопления нитратов в почвенных слоях от роста доз внесенного азота, особенно в верхних 0–100 и 100–200 см, где коэффициент $r = 0.73$ и 0,60 соответственно. Таким образом, исследование показало значимый агроэкологический эффект использования полужидкого навоза крупного рогатого скота в умеренной по содержанию азота дозе (N240), обеспечившей высокую продуктивность кормового севооборота, получение экологически безопасной растительной продукции, а также улучшение агрохимических и санитарно-гигиенических свойств почвы.

Положительные результаты агроэкологической эффективности органических удобрений были получены и в другом длительном опыте, где использовали подстилочный навоз крупного рогатого скота, а также сочетания его с минеральными

удобрениями на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Перед закладкой опыта почва содержала: гумуса — 1,4%, подвижного P_2O_5 (по Кирсанову) — 15,9, K_2O — 11,5 мг/кг при pH_{KCl} 5,9 ед.

Навоз вносили в 1-й ротации севооборота под картофель и озимую пшеницу, во 2-й и 3-й ротациях — под картофель, в 4-й ротации — под озимую рожь. Площадь опытной делянки 112 м², повторность вариантов трехкратная.

В течение 4-х ротаций полевого севооборота общей продолжительностью 30 лет изучали непосредственное действие удобрений, а в последней, 5-й ротации (в течение 7 лет) — последствие ранее внесенных удобрений при поддерживающей ежегодной азотной подкормке фоном в дозе N45.

Исследовали варианты удобрения: 1 — контроль, 2 — минеральная система (N90P90K90), 3 — органическая система (навоз 9 т/га), 4 — органо-минеральная система 1 (N30P30K30 + навоз 3 т/га), 5 — органо-минеральная система 2 (N60P60K60 + навоз 6 т/га), 6 — органо-минеральная система 3 (N90P90K90 + навоз 9 т/га), 7 — органо-минеральная система 4 (N120P120K120 + навоз 12 т/га), 8 — органо-минеральная система 5 (N150P150K150 + навоз 15 т/га). Чередование культур в 1-й ротации севооборота: картофель—ячмень—озимая рожь—горохоовсяная смесь—озимая пшеница—ячмень—многолетние травы 2-х лет пользования—озимая рожь—овес; во 2-й и 3-й ротациях: картофель—ячмень—многолетние травы 2-х лет пользования—озимая пшеница—овес; в 4-й

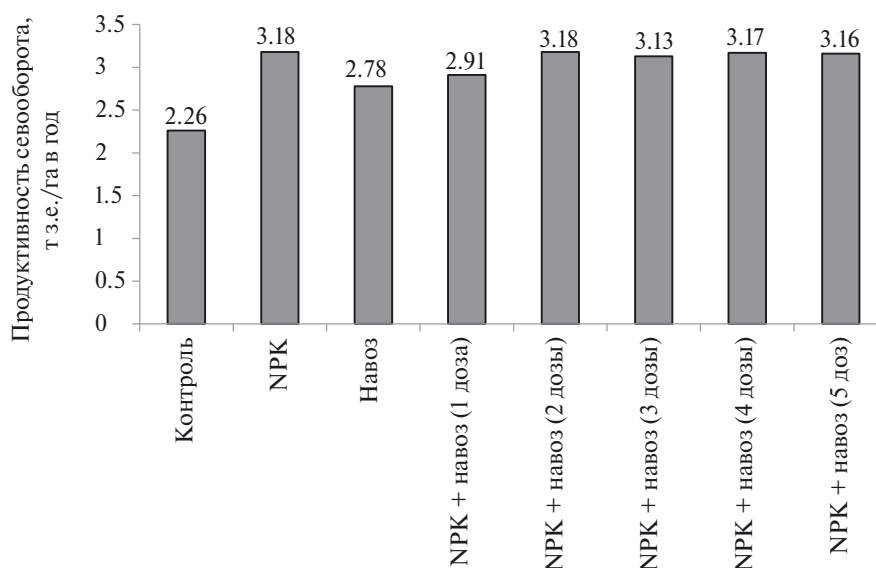


Рис. 3. Влияние подстилочного навоза и минеральных удобрений на продуктивность полевого севооборота.

и 5-й ротациях: овес на зеленый корм—озимая рожь—ячмень—многолетние травы 2-х лет пользования—яровая пшеница—овес.

При анализе длительного действия удобрений, в течение 37 лет, были получены достоверные прибавки урожайности полевых культур (при $HCP_{05} = 0.37$ т з.е./га) во всех вариантах опыта (рис. 3).

В варианте применения только навоза в двойной дозе, соответствующей внесению 6 т навоза/га ежегодно, средняя продуктивность севооборота составила 2.78 т з.е./га, или на 23% больше контроля. При внесении минеральной системы, а также органо-минеральной системы 2, т.е. в вариантах с таким же количеством питательных элементов, как и в органическом варианте, ежегодная продуктивность севооборота находилась на уровне 3.18 т з.е./га, что на 40.7% превышало контроль без внесения удобрений. Дальнейший рост доз удобрений в органо-минеральных вариантах не сопровождался повышением урожайности культур севооборота.

Следует отметить, что преимущество совместного внесения органических и минеральных удобрений при оптимизации доз перед органической системой подтверждено данными других исследований. Например, в полевом опыте Института органического сельского хозяйства и Федеральной опытной станции по агроэкологии (Швейцария), где изучали различные агротехнологии (внесение только минеральных удобрений, минеральных удобрений на фоне навоза и только навоза), продуктивность 7-польного севооборота (озимая

пшеница (2 поля)—многолетние травы (2 поля)—картофель—сахарная свекла—озимый ячмень) в среднем за 21 год в традиционных вариантах была на 20% больше, чем в органическом варианте. При этом отмечали большие изменения продуктивности различных видов культур: от 10% — пшеницы и многолетних трав до 40% — картофеля [11].

В нашем опыте, наряду с продуктивностью севооборота, была проведена оценка качества экологической безопасности растительной продукции при возделывании зерновых культур и картофеля (табл. 4).

Согласно полученным результатам, содержание белка в зерне пшеницы, а также овса в вариантах органической системы удобрения было меньше, чем при использовании минеральной и органо-минеральной систем. В то же время у озимой ржи этот показатель при всех системах удобрения был практически одинаковым, но заметно меньше в контроле, где удобрения не применяли. По содержанию крахмала в клубнях картофеля преимущество оставалось за контрольным и органическим вариантами. В этих же вариантах в картофеле содержалось меньше всего нитратов. В других вариантах удобрения содержание нитратов в клубнях повышалось, но во всех случаях, кроме органо-минерального варианта с максимальными дозами, оно не превышало допустимых норм ($250 \text{ мг NO}_3^-/\text{кг}$) [12]. Таким образом, повышенное содержание белка в зерновых культурах (озимой и яровой пшенице, озимой ржи, овсе) отмечено при внесении минеральных и органо-минеральных удобрений, а более высокое содержание крахмала

Таблица 4. Влияние навоза и минеральных удобрений на качество растительной продукции

Сельскохозяйственная культура	Показатель качества продукции	Варианты				
		Контроль	НРК	Навоз	НРК + навоз (3 дозы)	НРК + навоз (5 доз)
Пшеница яровая (зерно)	Белок, %	9.4	11.7	9.4	10.3	12.5
Пшеница озимая (зерно)	Белок, %	12.0	14.8	12.0	14.2	14.8
Рожь озимая (зерно)	Белок, %	8.7	8.2	8.0	8.0	8.3
Овес (зерно)	Белок, %	6.2	9.4	8.4	9.1	8.7
Картофель (клубни)	Крахмал, %	15.2	12.6	14.8	13.1	11.9
	Нитраты (NO_3^-), мг/кг	143	190	179	250	282

и пониженное содержание нитратов в картофеле — в варианте органической системы.

В опыте изучали длительное действие удобрений на гумусовое состояние почвы. Через 37 лет исследования содержание гумуса в почве резко (на 29%) снизилось по сравнению с исходным в контроле, при внесении минеральной и органо-минеральной системы с низкими дозами удобрений и в меньшей мере — в органо-минеральных вариантах с более высокими дозами.

Скорость дегумификации почвенного органического вещества в конце опыта в контроле составляла 0.33 т/га/год. Наибольшей (0.42 т/га/год) она была при внесении одних минеральных удобрений, а в органическом и органо-минеральных вариантах находилась на более низком уровне.

Примененные в опыте удобрения при систематическом внесении влияли на содержание нитратного азота в почве (рис. 4).

В конце 3-й ротации полевого севооборота (в 2000 г.) при возделывании озимой пшеницы отмечено низкое содержание N-NO_3 в пахотном слое почвы (0–20 см) в апреле и его повышение в мае–июле по сравнению апрельскими показателями, причем во всех вариантах опыта, кроме одностороннего внесения навоза. При этом осенью, в октябре при обильных атмосферных осадках, превышающих среднемноголетние нормы, содержание нитратного азота в верхнем слое почвы оставалось на том же уровне, как и в период вегетации, или даже было больше, что наблюдали в варианте применения органо-минеральной системы с высокими дозами удобрений и в контроле.

По окончании опыта в почвенных образцах определяли валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка (табл. 5).

Исследование показало, что длительное применение удобрений под культуры севооборота мало влияло на накопление поллютантов в почве по сравнению с контролем, где удобрения

не вносили. Отмечено лишь некоторое повышение содержания кадмия с 0.36 в контроле до 0.44 мг/кг, а также цинка — с 70 до 72 мг/кг при внесении максимальных доз удобрений в варианте применения органо-минеральной системы. Увеличилось также содержание мышьяка при использовании органической и органо-минеральных систем с 3–5-кратными дозами навоза и минеральных удобрений до 0.6–1.1 мг/кг почвы при с 0.4 мг/кг в контроле. При этом, несмотря на систематическое применение удобрений в течение 37 лет, содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве ни в одном из вариантов опыта не превышало ПДК/ОДК по СанПиН 1.2.3685-21 [13].

Растениеводческая продукция при внесении удобрений отличалась высоким качеством и была экологически безопасной по содержанию тяжелых металлов и мышьяка (табл. 6).

Например, в зерне овса — культуры, завершающей полевой севооборот, отмечено лишь некоторое увеличение по сравнению с контролем содержания кадмия, свинца и меди, а также мышьяка при внесении минеральной системы и органо-минеральных систем с умеренными и высокими дозами удобрений. Однако в целом в опыте во всех случаях в зерне овса не отмечено превышения допустимых уровней содержания тяжелых металлов и мышьяка.

Таким образом, исследованиями ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова в длительных полевых опытах с навозом крупного рогатого скота доказана высокая его эффективность при возделывании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых почвах. Прибавки урожайности культур севооборотов от применения навоза по отношению к контролю составили 16.7–23.0%, от совместного его внесения с минеральными удобрениями при оптимизации доз — 35.2–40.7%, что почти в 2 раза больше, чем при применении органической системы удобрения. Повышалось плодородие почвы, улучшалось ее

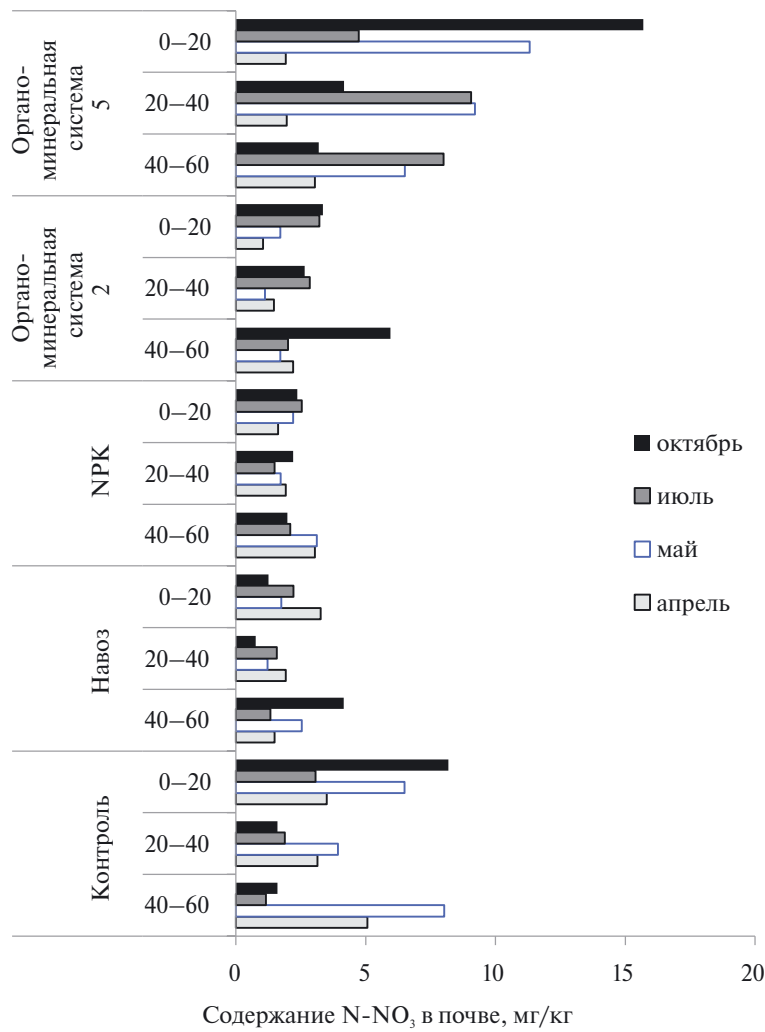


Рис. 4. Содержание нитратного азота в почве в зависимости от различных систем удобрения.

Таблица 5. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в дерново-подзолистой почве, мг/кг сухой массы

Вариант, система удобрения	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Hg	As
Контроль	0.36	24	70	12.5	16	0.01	0.4
Минеральная	0.35	23	68	12.8	16	0.02	0.3
Органическая	0.24	20	66	11.4	16	0.03	0.6
Органо-минеральная 3	0.27	21	69	12.1	17	0.01	1.1
Органо-минеральная 5	0.44	21	72	12.3	16	0.01	0.9
ПДК/ОДК (СанПиН 1.2.3685-21)	1.0	65	110	66	40	2.1	5.0

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса в зависимости от интенсивности систем удобрения, мг/кг сухой массы

Вариант, система удобрения	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Hg	As
Контроль	<0.01	0.06	17.6	3.46	2.99	<0.005	<0.01
Минеральная	0.03	0.17	24.1	2.24	2.29	<0.005	0.05
Органическая	0.01	0.06	12.6	2.25	2.15	<0.005	0.01
Органо-минеральная 3	0.03	0.11	18.3	2.09	2.61	<0.005	<0.01
Органо-минеральная 5	0.02	0.11	26.2	2.12	2.34	<0.005	<0.02
Допустимый уровень (СанПиН 2.3.2.1078-01)	0.1	0.5				0.03	0.2

гумусовое состояние, а также фосфатный и калийный режимы. При этом не отмечено избыточного накопления нитратов, тяжелых металлов и мышьяка в системе почва—растение, что свидетельствовало об экологической безопасности данных агроприемов.

ВЫВОДЫ

1. В исследованиях с длительным применением органических удобрений (полужидкого и подстилочного навоза крупного рогатого скота) установлено, что при оптимизации доз и сочетаний навоза с минеральными удобрениями достигался высокий агроэкологический эффект, улучшались агрохимические и санитарно-гигиенические свойства почвы, повышались урожайность и качество культур севооборота при исключении рисков загрязнения поллютантами окружающей среды.

2. При длительном ежегодном внесении полужидкого навоза крупного рогатого скота на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве высокая продуктивность кормового севооборота, составившая в среднем за 15 лет 9.6 т з.е./га, что больше контроля на 96%, установлена в варианте применения органо-минеральной системы удобрения с содержанием азота 240 кг/га. Органическая система в варианте с двойной дозой навоза (N240) по продуктивности севооборота уступала органо-минеральной и минеральной системам (с таким же количеством азота) на 16%. Корма, полученные при совместном внесении навоза и минеральных удобрений, характеризовались высокой протеиновой питательностью и экологической безопасностью, не были загрязнены нитратами и тяжелыми металлами. Систематическое применение органо-минеральной системы удобрения с использованием полужидкого навоза в дозе 240 кг N/га повышалось в почве содержание гумуса, подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) и не влияло существенно на накопление тяжелых металлов и нитратов.

3. При исследовании длительного действия возрастающих доз полужидкого навоза (со 120 до 600 кг N/га) установлен рост продуктивности севооборота с 7.28 до 10.3 т з.е./га в вариантах от единичной (N120) до четырехкратной дозы (N580). Дальнейшее увеличение дозы навоза не сопровождалось достоверным повышением продуктивности кормовых культур. Окупаемость 1 т навоза прибавкой урожая с возрастанием дозы снижалась с 64 до 36 кг з.е. Наиболее интенсивно (в 3.7 раза больше, чем в контроле) накапливались нитраты в слое 0—100 см почвы в варианте с максимальной дозой навоза (N600). Однако даже в этом случае не отмечено превышения содержания нитратов в почве сверх ПДК (130 мг NO_3^- /кг). Корреляционный

анализ показал зависимость накопления нитратов в почвенных слоях от роста доз внесенного азота, особенно в верхних 0—100 и 100—200 см, при коэффициенте $r = 0.73$ и 0.60 соответственно.

4. Длительное применение подстилочного навоза было эффективным в сочетании с минеральными удобрениями в вариантах навоз 6—9 т/га + N60—90P60—90K60—90, где ежегодный сбор зерновых единиц в среднем за 37 лет исследований превышал 3 т/га. Растениеводческая продукция при этом отличалась высоким качеством. В зерне содержалось до 14% белка, в клубнях картофеля — до 13% крахмала при допустимом содержании нитратов. Содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) и мышьяка, а также нитратов в почве зависело, как правило, от интенсивности удобрения, но в целом соответствовало предельно допустимым концентрациям (по СанПиН 1.2.3685-21).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прянишников Д.Н.* Избр. соч.-я. Т. 1. М.: Колос, 1965. 767 с.
2. *Агрохимия. Классический университетский учебник для стран СНГ / Под ред. В.Г. Минеева, В.Г. Сычева, Г.П. Гамзикова.* М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
3. *Кидин В.В.* Система удобрения. М.: РГАУ—МСХА, 2012. 534 с.
4. *Державин Л.М., Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е.* Методология комплексного применения удобрений и пестицидов в интенсивном земледелии. М.: ВНИИА, 2016. 337 с.
5. *Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е., Беличенко М.В.* Оценка результатов мониторинга содержания и баланса гумуса в длительных опытах Геосети // *Плодородие*. 2017. № 6. С 28—30.
6. *Биоконверсия побочных продуктов животноводства и отходов АПК: коллект. монограф. Владимир: ВНИИОУ — филиал Верхневолжского ФАНЦ. Иваново: ПресСто, 2023. 333 с. DOI: 10.51961/9785605088035*
7. *Лукин С.М.* Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 49 с.
8. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Колос, 1979. 416 с.
9. *Методические и организационные основы проведения агроэкологического мониторинга в интенсивном земледелии (на базе Географической сети опытов) / Под ред. Н.З. Милащенко, Ш.И. Литвака.* М.: ВИУА, 1991. 354 с.

10. Программа и методика исследований в Географической сети полевых опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии / Под ред. В.Д. Панникова, Д.А. Коренькова, А.В. Пухальского М.: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1990. 187 с.
11. Горчаков Я.В., Дурманов Д.Н. Мировое органическое земледелие XXI века. Монография. М.: Изд-во ПАИМС, 2002. 402 с.
12. СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”.
13. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (с изменением на 30 декабря 2022 г.).

Nitrates and Heavy Metals in Agrocenoses with Prolonged Use of Organic Fertilizers

G. E. Merzlaya[#]

*D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia*

[#]*E-mail: lab.organic@mail.ru*

In field experiments on sod-podzolic soils, the agroecological effectiveness of long-term action of cattle manure of various humidity was studied. It is shown that the use of semi-liquid bedless and litter manure, when optimizing doses and combinations with mineral fertilizers, improved soil fertility, increased the productivity of crops and crop rotations, ensured the environmental safety of agrocenoses, reduced the risks of accumulation of nitrates and heavy metals in soil and plants. The annual application of semi-liquid manure for 15 years to sod-podzolic heavy loamy soil in the forage crop rotation in the variant of the organo-mineral fertilizer system with a content of 240 kg N/ha ensured their high efficiency – 9.8 t c.u./ha, which was 96% more than the control. The resulting feed was characterized by high protein nutrition, and the nitrate content corresponded to the norms of feeding farm animals. The use of increasing doses of semi-liquid manure increased the productivity of forage crop rotation from 7.28 to 10.3 tons of grain/ha in variants using a single (N120) to a fourfold dose (N580). Increasing the dose of manure to N600 proved ineffective. Depending on the dose of manure, the nitrate content in the layers of the soil profile changed. Nitrates accumulated most intensively (3.7 times more than in the control) in a layer of 0–100 cm of soil in the variant with the maximum dose of manure (N600). At the same time, there was no excess of nitrate content in the soil above the MPC (130 mg NO₃⁻/kg). A correlation has been established between the accumulation of nitrates and the increase in nitrogen doses introduced with manure in soil layers, especially in the upper 0–100 and 100–200 cm, with correlation coefficients $r = 0.73$ and 0.60 . With prolonged use of litter manure on sod-podzolic light loamy soil, its combination with mineral fertilizers at a dose of N180 was effective, where the annual harvest of grain units averaged 3.1 tons per hectare over 37 years, or exceeded the control by 38.5%. At the same time, vegetable products were of high quality – the grain contained up to 14.2% protein, potato tubers – up to 13% starch at an acceptable level of nitrate content. The content of heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) and arsenic, as well as nitrates in the soil, depended on the intensity of fertilization with litter manure, but generally corresponded to acceptable standards.

Keywords: semi-liquid and litter manure, doses and combinations with mineral fertilizers, soil properties, agrocenoses, yield, nitrates, heavy metals.